文章编号:1674-2974(2026)03-0127-12 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026031

考虑误差影响的高速公路检测器优化布设

李洁[1],叶湘[1†],秦晨洋[2]
(1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;
2. 广西交科集团有限公司,广西 南宁 530007)

摘 要:为提升交通状态估计精度与事件检测能力,提出了考虑误差影响的两阶段高速公路检测器布设优化方法,并引入机会约束表征误差的不确定性.第一阶段以服务水平估计精度为优化目标,制定检测器初步布设方案;第二阶段集成3种交通事件检测模型,以提升事件检测率为目标开展检测器增设优化.两个阶段均采用遗传算法(genetic algorithm,GA)进行求解.基于FOSIM仿真平台,以广西某高速公路为对象构建模型,设置4组不同误差水平的实验以评估优化方法的性能.结果表明,第一阶段中,无误差组的服务水平估计精度随检测器布设数量增加而提升,含误差组则呈先升后降趋势,且误差水平越大,估计精度越低;第二阶段中,交通事件检测率随误差加剧显著下降.检测器增设优化后,含误差组的检测率提升幅度更大,而无误差组检测性能上限更高,这表明不同误差条件下优化策略的响应机制存在差异.误差水平对两阶段的评价指标均有显著影响.增设优化后服务水平估计指标虽略有降低,但整体保持在良好水平,验证了两阶段法的有效性.

关键词:交通工程;检测器优化布设;误差影响;高速公路;机会约束
中图分类号:U491 **文献标志码**:A

Optimization of expressway sensor deployment considering error impact

LI Jie[1], YE Xiang[1†], QIN Chenyang[2]
(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, China)

Abstract: This study proposes a two-stage optimization approach for expressway sensor deployment to improve traffic state estimation accuracy and incident detection capability, while explicitly accounting for error effects through the introduction of chance constraints to represent uncertainty. In the first stage, an initial sensor deployment scheme is designed with the objective of maximizing service level estimation accuracy. In the second stage, three traffic incident detection models are integrated, and additional sensors are deployed to improve detection rates. Genetic algorithms are employed in both stages to solve the optimization problems. A case study based on the FOSIM simulation platform is conducted on an expressway in Guangxi Province, with four experimental scenarios under

* **收稿日期**:2025-01-13
基金项目:湖南省科学技术厅重点研发项目(2022SK2096),Department of Science and Technology of Hunan Province(2022SK2096);湖南省交通运输厅科技项目(202203),The Science and Technology Program of Hunan Provincial Department of Transportation(202203);湖南省交通运输厅科技项目(202322),The Science and Technology Program of Hunan Provincial Department of Transportation(202322)
作者简介:李洁(1972—),女,湖南株洲人,湖南大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail: yxsiren@163.com

varying error levels to evaluate the performance of the proposed method. Results show that in the first stage, service level estimation accuracy improves with increased sensor quantity in the error-free group, while it exhibits a rise-then-fall trend in error-influenced groups, with larger errors leading to lower accuracy. In the second stage, detection rates decline significantly under intensified error conditions. Error-influenced groups demonstrate greater improvements after sensor addition, whereas the error-free group exhibits a higher performance ceiling, indicating differentiated response mechanisms under varying error conditions. Error levels have a significant impact on evaluation metrics in both stages. Although service level accuracy slightly decreases after sensor addition, it remains at a satisfactory level overall, validating the effectiveness of the proposed two-stage approach.

Key words: traffic engineering; sensor optimization deployment; error impact; expressway; chance constraint

随着高速公路网络的日益发展,交通信息的精准采集与分析成为提升交通系统运行效率、优化资源配置及降低交通事件影响的关键环节.检测器作为交通信息采集的关键设备,其布设的合理性及有效性直接关系到交通信息采集的完整性与准确性,进而影响交通管理的决策.

根据布设目的不同,高速公路检测器(简称检测器)布设方法可分为面向行程时间估计、面向交通事件检测和面向交通状态估计3大类[1-3].①在面向行程时间估计的布设研究中,储浩等[4]研究了行程时间估计误差与检测器密度的关系,结果表明随着检测器布设密度增加,检测的准确性并未提升,检测器的布设密度应控制在合理范围内.展凤萍[5]以行程时间估计误差最小为目标,考虑检测器的检测精度设置误差模拟实际情景,采用整数规划模型,以二进制变量表示检测器布设决策,并采用GA求解.Olia等[6]采用非支配排序遗传算法优化检测器布设的位置与数量,并研究了不同网联车辆渗透率下检测器数量对行程时间估计精度的影响.②在面向交通事件检测的布设研究中,Cao等[7]建立了交通事故风险评估模型与多种传感器组合布设的优化模型,降低了交通事故不确定性对检测结果的影响.③在面向交通状态估计的布设研究中,Fu等[8]以最小化因未覆盖检测器而产生的损失为目标,建立了两阶段随机规划模型,并在不同路网中验证了该方法的有效性.Contreras等[9]基于系统动力学方法,分析了检测器的不同布设方案下交通状态的可观测性,其结果表明高速公路的第一个和最后一个路段单元必须布置检测器,以识别各种交通状态.罗向龙等[10]以最小交通流预测的误差为目标函数,使用小波神经网络算法进行短时交通流预测,采用GA求解检测器优化布设方案.董春肖等[11]基于BP神经网络研究了不同布设方案对短时交通流量预测的影响,并根据预测结果选择最优布设方案.

除此之外,部分研究考虑了交通路网[12-14]、检测器误差[15]、检测器故障[16-17]、道路线形[18]等因素影响下的检测器布设方法.Tong等[19]以最大检测精度为目标,建立了考虑传感器与服务器位置的优化模型,并分析了成本、通信半径以及道路斜坡长度对布设方案的影响.Lovisari等[20]融合多种检测器的采集数据,建立了凸优化模型,以交通路网状态估计精度为目标研究布设方案.Li等[21]将检测器布设视为子集选择问题,使用多项式时间算法求解检测器布设的组合优化问题.

尽管已有研究从多角度探讨了检测器布设问题,形成了较为系统的理论基础和实践模型,但仍存在一些不足之处:一方面,现有研究大多将交通状态估计与交通事件检测作为独立问题分别建模与优化,缺乏对二者之间耦合关系的深入探讨与联合考虑,难以满足高速公路管理中对“宏观掌控-微观响应”一体化需求;另一方面,关于检测器误差的处理仍以固定误差设定为主,较少关注误差随环境变化、设备老化等因素产生的不确定性,以及其对检测效能的系统性影响.因此,本研究从高速公路服务水平评估与事件响应双重视角出发,采用两阶段法研究检测器的布设策略.第一阶段以服务水平估计精度为导向,构建覆盖关键路段的检测网络,为交通状态感知提供基础支撑;第二阶段在初始布设基础上优化增设位置,提升系统对局部异常的响应能力与事

件识别效率.整个流程采用二进制整数规划模型,并引入基于不同目标函数的GA进行求解.

在数据处理层面,部分研究关注到检测器误差问题,但通常采用插入固定误差值的方式,忽视了误差的不确定性及其因环境条件、设备老化和维护不当等因素产生的改变.为此,本研究引入机会约束模型刻画检测器误差的概率分布特性,以模拟检测器在使用初期的误差表现,并量化误差对检测器布设效益的影响,从而更准确地评估检测器布设方案的应用效果.

1　第一阶段模型:面向服务水平估计

交通状态估计在道路监测与交通管控方面具有重要意义,能够为交通流量调控和优化交通管理决策提供关键数据支持.本阶段从交通管理需求出发,以路段服务水平估计为优化目标,研究检测器的布设策略,旨在综合反映高速公路的服务质量.

1.1　优化目标

假定高速公路的路段总长度为L,路段单元长度为s,将该路段划分为$N=L/s$(向下取整)个等长的路段单元,沿行驶方向对路段单元进行编号(从1到N).本阶段的核心变量为固定检测器的布设方案,即针对高速公路上的各个候选路段,确定是否布设固定检测器.定义优化布设的决策变量$N=[n_1,n_2,n_3,\cdots,n_j,\cdots,n_N]$,其中$n_j\in\{0,1\}$,$\forall j\in\{1,2,3,\cdots,N\}$.若$n_j=1$,表示在第$j$个路段布设固定检测器;若$n_j=0$,表示该路段不布设检测器.解决固定检测器布设问题的关键在于优化服务水平(v/C)的估计精度.设定检测器的布设数量为M,高速公路被M个检测器划分为$M+1$个路段.如图1所示,图中实心三角为检测器的模拟布设点,空心三角为检测器待布设点.

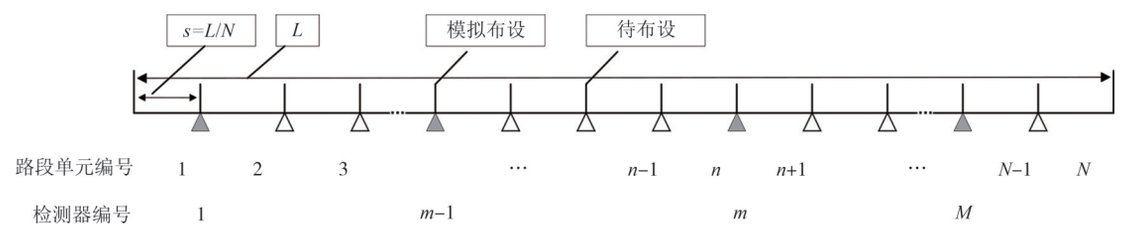


图1　高速公路检测器布设示意

Fig.1　Schematic diagram of expressway sensor deployment

根据《公路工程技术标准》(JTG B01—2014),v/C值能够有效反映道路的拥堵程度和通行效率,通常用于综合评价道路的服务质量.因此,本研究选用v/C作为高速公路服务水平的评价指标,计算见式(1).

$$v/C_{\mathrm{E}}=\begin{cases}\dfrac{q_1}{C}, & m=1\\ \dfrac{q_{n_{m-1}}+q_{n_m}}{2C}, & 2\leqslant m\leqslant M\\ \dfrac{q_{n_m}}{C}, & m=M+1\end{cases}\tag{1}$$

式中:v/C_{E}为高速公路服务水平的估计值;q_{n_m}表示在编号为n_m的路段单元上第m个检测器检测的交通流量,n_m为第m个检测器所在路段单元的编号(如$n_2=8$表示第2个检测器布设在第8个路段单元上);C为路段的基准通行能力;M为检测器的布设数量.

道路断面服务水平的估计精度的评价指标为平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error,MAPE)M_{APE},其计算见式(2).

$$M_{\mathrm{APE}}=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{\left|v/C_{\mathrm{E}}-v/C_{\mathrm{T}}\right|}{v/C_{\mathrm{T}}}\times 100\%\tag{2}$$

式中:v/C_{T}为各路段断面实际交通量与基准通行能力的比值.第一阶段检测器布设的优化目标为最小化M_{APE},见式(3).

$$\min M_{\mathrm{APE}}=\min\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{\left|v/C_{\mathrm{E}}-v/C_{\mathrm{T}}\right|}{v/C_{\mathrm{T}}}\times 100\%\tag{3}$$

1.2　约束条件

1.2.1　交通量检测机会约束

在检测器布设方案的初期运行阶段,设备尚处于磨合和性能稳定期,检测精度可能受到多种因素(如环境扰动、硬件状态、安装误差等)影响而表现出不确定性.为了更准确地模拟该阶段检测性能的不确定性,引入机会约束模型,以概率形式约束检测器精度指标,确保系统在大多数情况下仍能满足国家标准所规定的检测要求.机会约束通过设置概率阈值,确保某一指标在大多数情况下满足特定条件.以

微波检测器为例,其投入使用初期,一定置信度条件下满足《交通信息采集 微波交通流检测器》(GB/T 20609—2023)[22]规定的检测精度要求,见表1.

表1 微波检测器检测精度

Tab.1 Microwave detector detection accuracy %

交通参数	检测精度
交通量	≥95
平均速度	≥95

考虑交通量检测值Q_D与真实值Q_T两者间存在误差项ε,见式(4).

$$Q_D = Q_T + \varepsilon \tag{4}$$

式中:误差项ε被视为服从某一概率分布的随机变量.为简化推导,本文初步假设$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$,即误差服从零均值正态分布,其标准差$\sigma$可由实测误差数据估计.

基于以上假设,交通量的相对误差满足如下概率约束,见式(5).

$$P_q\left\{\left|\frac{Q_T - Q_D}{Q_T}\right| \leqslant \alpha\right\} \geqslant \beta \tag{5}$$

式中:$P_q\{\cdot\}$表示括号中事件发生的概率;α为检测器的交通量检测误差阈值,α越大,检测精度越低;β为置信度,β越大,满足约束条件的交通量数据越多.

1.2.2 检测器布设数量约束

鉴于交通管理要求、基础设施条件以及建设预算等因素的综合制约,检测器的布设规划须在有限资源条件下实现最优配置.为模拟现实中的成本限制,本研究将检测器可布设数量设置为约束条件,反映实际部署中预算与资源的限制因素.在此约束条件下,通过算法优化设计检测器布设方案,提升交通信息采集的整体效能,检测器布设数量约束见式(6)、式(7).

$$\sum_{j=1}^{N} n_j = M \tag{6}$$

$$n_j \in \{0, 1\} \tag{7}$$

式(6)为检测器的布设总数约束,其中M为检测器初步布设数量.式(7)中n_j为路段单元j的检测器布设情况,当第j个路段单元布设检测器时,其二进制变量为1,反之为0.

1.2.3 检测器布设间距约束

检测器布设间距受到其检测范围的制约,且不同类型的检测器具有不同的检测范围.因此,布设间距的设置需综合考虑检测器的实际检测能力、路段的交通特性及精度要求,确保监测系统在满足高精度数据采集的同时,优化资源配置并实现经济效益最大化.检测器的布设间距约束见式(8).

$$n_m - n_{m-1} \geqslant a \tag{8}$$

式中:n_m、n_{m-1}分别为第m、$m-1$个检测器所在路段单元的编号,指两检测器间距离不小于a个路段单元,具体取决于路段单元长度的划分与检测器最小布设间距要求.

1.3 模型求解

整数规划问题常见求解方法有分支定界法、枚举法、割平面法、模拟退火算法以及GA[5]等.传统的优化方法(分支定界法、枚举法、割平面法等)在求解变量规模较小或可行解空间有限的问题时,具有较高的求解精度和收敛性.交通检测器布设问题通常有庞大的解集合和复杂的组合结构,易导致传统方法在求解效率和可扩展性方面受限.因此,本文选用具备全局搜索能力且适用于大规模组合优化问题的GA进行求解,以更高效地搜寻最优布设方案.GA通过模拟自然选择和遗传机制,对种群内个体进行迭代优化,逐步逼近问题的最优解.本研究中,GA将每个路段单元视为一个基因,染色体中的基因序列与具体的检测器布设方案一一对应.基因编码序列示意如图2所示.



图2 基因编码序列示意

Fig.2 Schematic diagram of gene coding sequence

GA的目标是寻找实现最小化适应度函数的检测器布设方案.本阶段的适应度函数即服务水平指标估计M_{APE}.基于GA的寻优过程如下:

步骤1:输入各检测器待布设点采集的交通量数据.

步骤2:初始化种群.设置种群规模、最大迭代次数、交叉概率与变异概率,计算染色体适应度(M_{APE}).为提升算法初始解质量,引入启发式策略:在初始化染色体(布设方案)时,优先选取位于交通关键节点(如匝道、服务区、合流段等)附近的检测器

位置,以提高空间中优质解的数量.

步骤 3:选择、交叉与变异.采用轮盘赌选择算子对种群内个体进行筛选,并通过交叉操作生成新一代染色体,同时引入适度的变异操作以增强种群多样性,避免算法在迭代过程中陷入局部最优.

步骤 4:基因修复.因交叉与变异操作的随机性,部分染色体可能违反检测器布设数量约束.为确保解的可行性,对基因序列中“1”的数量(代表检测器布设位置)进行修复:若其数量大于设定值,则随机将若干“1”置换为“0”;若小于设定值,则将若干“0”置换为“1”.

步骤 5:终止判定与结果输出.当进化代数达到预设的最大迭代次数时,算法终止,输出在全部迭代过程中获得的适应度最优个体,即 M_{APE} 最小的检测器布设方案,将其作为本阶段的最优初步布设结果.

第一阶段 GA 流程图如图 3 所示.

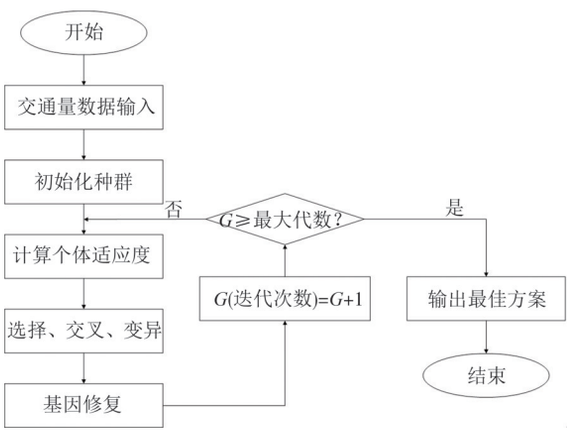


图 3　第一阶段 GA 流程图

Fig.3　First stage GA flowchart

2　第二阶段模型:面向交通事件检测

交通事件检测在保障道路安全与提升通行效率方面发挥着关键作用,能及时识别并响应突发事件.本阶段基于初步布设结果,构建优化模型以提高交通事件检测效果,通过研究固定检测器的增设方案及其对检测效果的影响,为交通管理者提供科学、合理的检测器布设策略,提升交通事件响应能力.

2.1　优化目标

第一阶段以最大化服务水平估计精度为目标,求解检测器的初步布设方案后,第二阶段以提高实时检测交通事件效果为目标,针对第一阶段未布设检测器的路段单元进行增设规划.在此阶段,通过新增布设点采集的交通参数,如检测器的空间位置、采集时间、交通量数据、平均速度等,提供更全面的路况信息与更精细的数据粒度,提高交通事件检测效果.本阶段的主要目标在于以最大化交通事件检测率(detection rate, DR)D_{R},优化交通检测器的布设方案,其计算见式(9).

$$\max D_R = \frac{D_N}{R_N} \times 100\% \tag{9}$$

式中:D_N 为路段正确检测到的交通事件数;R_N 为路段真实发生的交通事件数.

本研究将交通事件定义为随机发生并显著降低道路通行能力的突发性事件,如交通事故、道路维修及货物散落等.交通事件检测系统的性能除了依赖检测器的数据采集质量,还取决于检测模型算法的有效性.为探索高效的检测模型算法,本文选用支持向量机(support vector machine, SVM)、极端梯度提升(extreme gradient boosting, XGBoost)和随机森林(random forest, RF)3 种经典模型进行交通事件检测.上述 3 种模型在交通事件检测领域均具有较好的理论基础和实用性,分别对应线性分类、非线性分类及集成学习三大技术路径的核心优势,兼具典型性和互补性.

1)SVM 模型.SVM 是一种基于结构风险最小化原则的监督学习方法,适用于小样本、高维、非线性问题.其核心思想是通过核函数将原始特征空间非线性映射至高维空间,从而实现线性可分.SVM 的关键在于核函数的构建与分类决策函数的实现,其分类决策函数见式(10).

$$f(\boldsymbol{x}) = \mathrm{sgn}\left[\sum_{i=1}^{N} \alpha_i y_i K(x_i, \boldsymbol{x}) + b\right] \tag{10}$$

式中:$\boldsymbol{x}$ 为输入特征向量,对应于训练集与验证集,包含特征列;$K(x_i, \boldsymbol{x})$ 为核函数,用于将数据映射至高维空间;α_i 为拉格朗日乘子,与支持向量相关;y_i 为分类标签,在本研究内对应于是否发生交通事件标签;b 为偏置项.

2)XGBoost 模型.XGBoost 是一种基于梯度提升的集成学习算法,通过在前一轮弱分类器的基础上不断构建新树,以最小化加权损失函数为优化目标.在交通事件检测中,XGBoost 通过拟合训练数据中的误差残差,学习复杂交通特征与事件发生之间的非线性关系,其目标函数可表达为式(11).

$$\mathcal{L}(\theta) = \sum_{i=1}^{N} l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{k=1}^{K} \Omega(f_k) \tag{11}$$

式中:$l\left(y_i,\hat{y}_i\right)$为误差损失函数,衡量预测值与真实值之间的误差,常采用对数损失函数;$\Omega\left(f_k\right)$为正则化项,用于控制模型复杂度,防止过拟合.

3)RF模型.RF通过构建多个决策树,并对所有决策树的预测结果进行投票实现最终分类,具有良好的泛化能力和抗噪性能.在交通事件检测中,RF对多个子样本进行训练,融合各决策树的预测结果以判定事件发生与否.其集成投票机制可表示为

$$\hat{y}=\arg\max_{y}\sum_{i=1}^{K}I\left[f_i(\boldsymbol{x})=y\right] \tag{12}$$

式中:$f_i(\boldsymbol{x})$为第i棵树的预测结果;I为指示函数,当$f_i(\boldsymbol{x})=y$时为1,否则为0,表示第i棵树对类别y的投票.

为进一步提升模型性能,在性能评价中,模型部分采用堆叠集成策略,以SVM、XGBoost和RF为基学习器,逻辑回归为元学习器.训练完成后,基于测试集计算堆叠模型的准确率,并作为当前布设方案下交通事件检测性能指标.该集成策略有助于减弱单一模型可能引入的偏倚,增强交通事件检测结果的稳定性.

2.2 约束条件

2.2.1 交通量与速度检测机会约束

由于本阶段选取的交通参数包括交通量和路段的平均速度,故检测器的检测误差机会约束需分别针对这两个参数进行建模.交通量的机会约束模型同式(5),交通速度的机会约束模型见式(13).

$$P_{\mathrm{v}}\left\{\left|\frac{V_{\mathrm{T}}-V_{\mathrm{D}}}{V_{\mathrm{T}}}\right|\leqslant\alpha_1\right\}\geqslant\beta_1 \tag{13}$$

式中:$P_{\mathrm{v}}\{\cdot\}$表示括号中事件发生的概率;V_{T}为速度的真实值;V_{D}为速度的检测值;α_1为检测器的瞬时速度检测误差阈值,α_1越大,检测精度越低;β_1为置信度,β_1越大,满足约束条件的速度数据越多.

2.2.2 检测器增设数量约束

检测器的增设数量因成本限制受到约束,见式(14)、式(15).

$$\sum_{j=1}^{N}Z_j=M_{\mathrm{Z}} \tag{14}$$

$$Z_j\in\{0,1\} \tag{15}$$

式(14)为检测器的增设总数约束,其中M_{Z}为检测器增设总数量.式(15)中Z_j指路段单元j的检测器增设情况,当第j个路段单元增设检测器时,其二进制变量为1,反之为0.

2.2.3 检测器增设间距约束

由于检测器增设阶段基于前一阶段的布设方案进行,因此,布设间距需充分考虑已有方案.该阶段的布设间距约束条件为与初步布设方案所在位置不重合,见式(16).

$$n_m\neq n_{\mathrm{Z}} \tag{16}$$

式中:n_m为初始方案检测器所在路段单元编号;n_{Z}为增设方案中检测器所在路段单元编号.

2.3 模型求解

受成本等因素限制,交通检测器无法实现全路段覆盖,导致部分未布设检测器的路段无法直接获取交通参数数据.为解决由此带来的数据缺失问题,需对这些路段的交通数据进行合理估算与补全.本研究采用邻接节点估算法,基于相邻布设检测器所采集的交通数据,对缺失路段进行估算.当某路段仅有单侧相邻检测器布设时,则估算值取该单侧检测器的数据进行估算;若两侧均有检测器布设,则基于其采集数据的均值进行估算.

本阶段仍然使用GA求解增设方案.首先,将各检测器采集的交通参数作为输入,构建01(0表示该路段未布设检测器,1表示该路段布设检测器)整数规划模型,并设置检测器的增设数量.然后,采用邻接节点估算法补全未布设检测器路段的交通数据,以集成模型的交通事件检测率为适应度函数,计算个体适应度.最后,给定交叉与变异的概率,修复不满足增设数约束的基因,筛选出增设后检测率高于未增设阶段的增设方案,并输出给定迭代次数内交通事件检测率最高的增设方案.第二阶段GA流程图如图4所示.

3 实例研究与误差分析

3.1 数据准备

本研究以广西壮族自治区某在建高速公路为研究对象.项目全长37.551 km,设计速度为120 km/h,双向四车道,含互通式立交4处,服务区1处,收费站2处.考虑到大多数检测器的检测范围约为500 m,设置检测器最小布设间距为500 m.为丰富布设方案,将高速公路划分为250 m的路段单元.基于该高速公路的交通调查数据及可行性研究报告,采用FOSIM仿真软件构建该高速公路的交通仿真模型.

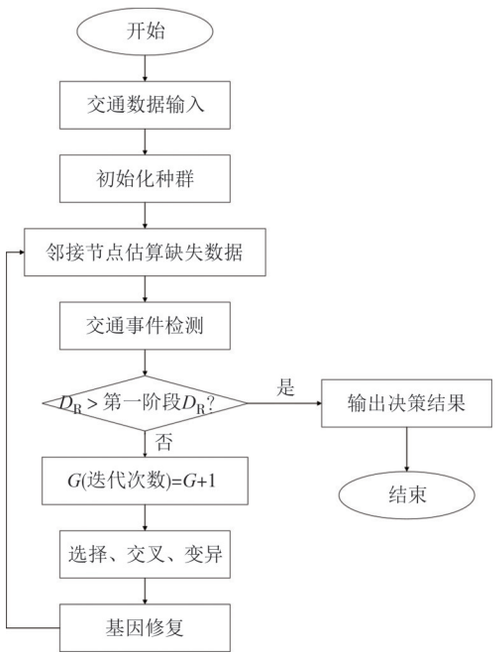


图 4　第二阶段 GA 流程图

Fig.4　Second stage GA flowchart

FOSIM 是一款微观交通仿真软件,能够通过设定车道类别、限速、变道行为、车辆比例及交通流量等参数,模拟目标路段的交通状况. 该软件具有建模迅速、运行高效、仿真结果全面等优点.

以微波检测器为例,研究假定仿真软件输出的数据代表完全无误差的理想数据,即“真实值”. 为了模拟不同使用阶段的检测精度,设计了 3 组对照实验,以低误差数据、中误差数据和高误差数据分别代表检测器在使用初期、中期和后期的性能状态,并与无误差数据共同构成 4 组实验数据. 假设检测器在使用初期具有较高的检测精度,考虑到误差值的不确定性以及表 1 的要求,构建交通量误差为机会约束模型:在基准交通量数据的基础上,设定误差在 ±5% 的范围内的概率至少为 95%. 将该误差以正态分布形式引入到仿真结果,生成低误差数据. 随着检测器运行时间增长,其性能受到环境、设备老化等多重因素影响,导致误差水平逐渐上升. 为此,检测器在使用中期与使用后期的误差设定参考了长沙市的交通检测器调查数据[23],分别对应中误差数据和高误差数据. 各实验组误差的范围和比例见表 2.

表 2　各实验的误差范围及比例

Tab.2　Error range and proportion of each experiment

误差水平	0%	0%<~5%	5%<~10%	10%<~20%	20%<~100%
无误差数据	100%	0%	0%	5%	0%
低误差数据	95%		0%	0%	0%
中误差数据	50%		30%	10%	10%
高误差数据	30%		30%	20%	20%

仿真总时长设定为 2 h. 为提高数据的稳定性与代表性,本研究选取第 0.5~1.5 h 之间的仿真数据作为分析对象. 依据高速公路断面单元划分,仿真模型共设有 150 个数据采集点,均作为传感器候选布设位置(图 5). 根据两阶段优化的不同目标,对数据进行差异化处理:第一阶段提取研究时间段内各路段单元的累计交通流量数据;第二阶段每 150 s 统计一次各路段单元的平均车速与交通流量.

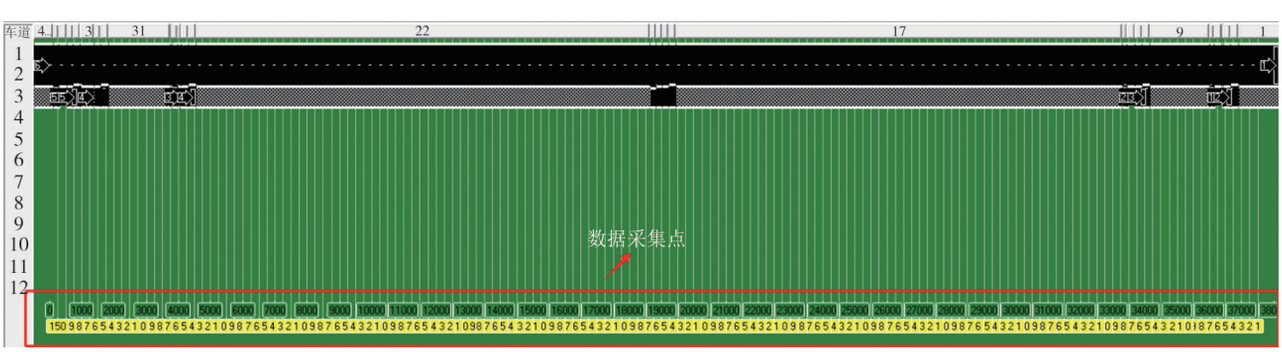


图 5　仿真检测器布设示意图

Fig.5　Schematic diagram of simulation sensor deployment

3.2　实例与分析

3.2.1　第一阶段实例研究与结果

将模型中检测器布设数量分别设置为 20、25、30、35、40、45、50、55 个,求解不同检测器布设数量下的最优方案及 M_{APE}.

为验证 GA 在本问题中的适用性,本文选取两种典型优化策略与 GA 进行对比:贪心-随机搜索与贪心-模拟退火. 尽管分支定界法可用于求解组合优化问题,但当节点数超过 100 时,计算复杂度显著增高,导致求解效率过低,因此未作为对比方法. 为确保比

较的公平性,在两种对比算法中均嵌入了与GA初始化阶段启发式策略相近的贪心模块,以提升初始解质量并引导搜索向较优区域收敛.以布设20个检测器为例,在4类误差数据组下的M_{APE}结果如图6所示.

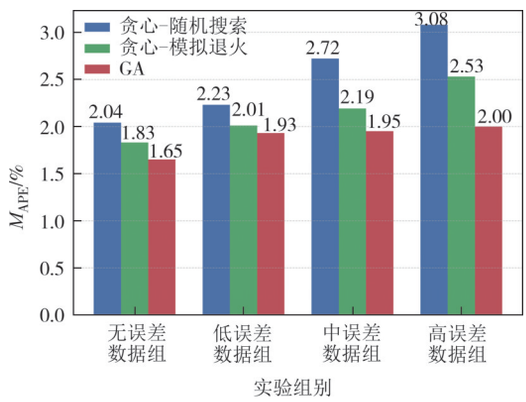


图6 各算法在不同误差水平下的性能对比

Fig.6 Performance comparison of various algorithms under different error levels

由图6可知,GA在所有数据组中均表现出较优的性能,在低误差数据组和中误差数据组中,相较于贪心-模拟退火算法,GA的M_{APE}值更稳定且略低.此外,贪心-随机搜索策略在所有数据组中的M_{APE}均高于其余两种算法,表明其整体性能较弱.总体而言,GA在收敛速度和解的质量上均优于贪心-随机搜索与贪心-模拟退火,验证了GA在本研究中的有效性和优势.

本阶段GA的各参数如表3所示,4组检测器布设方案的M_{APE}计算结果如图7所示.

表3 GA参数设置

Tab.3 GA parameter settings

参数	染色体长度	种群大小	迭代次数	交叉概率	变异概率
取值	150	200	100	0.9	0.1

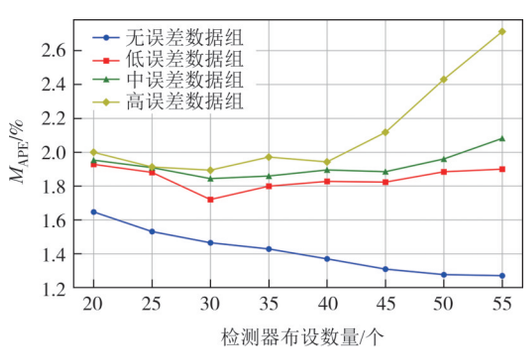


图7 布设方案的M_{APE}比较

Fig.7 Comparison diagram of M_{APE} for deployment plan

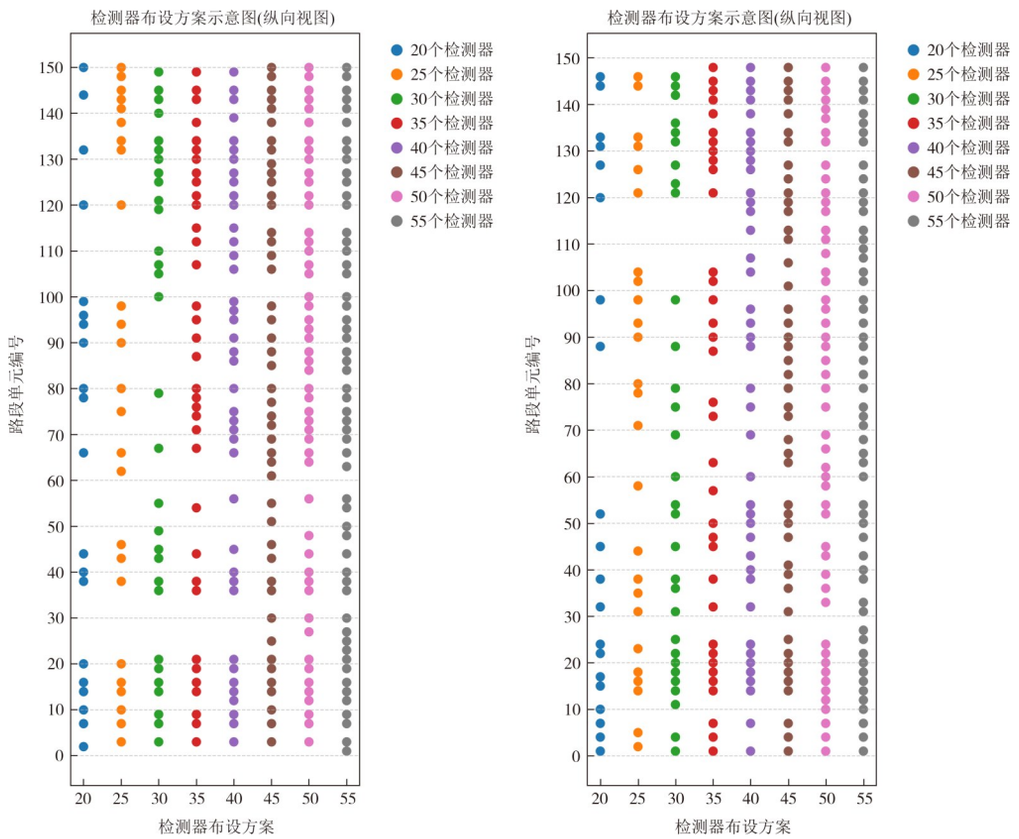
由图7可得出以下结论:

1)在误差影响下,增加检测器数量并不能持续提升服务水平的估计精度.M_{APE}通过预测值和实际值的差异来衡量预测模型的准确性.M_{APE}值越小,服务水平指标(v/C)的估计精度越高.除无误差数据组随着检测器布设数量增加,M_{APE}呈逐渐减小外,其余3组含误差实验组的M_{APE}整体呈先减小后增大的变化规律,表明当存在检测误差时,适当地增加检测器数量能在一定程度上提升服务水平估计的精度;但当检测器的数量超过阈值(布设数量30个)后,估计精度反而开始下降.造成该现象的可能原因可归结为以下三方面:首先,FOSIM仿真模型基于设定的交通量参数以随机方式生成车辆输入,模拟交通流的随机波动,使得检测器采集的交通流数据本身带有一定的随机性;其次,随着检测器数量增加,系统中包含的误差信息也随之增多,误差可能在空间上传播并相互干扰,进而加剧估计偏差;最后,过多的检测器还可能导致采集数据冗余和不一致,削弱模型对真实交通状态的刻画能力.因此,合理布局检测器不但可以避免过度建设导致的资金浪费,还可以减少冗余和矛盾数据,确保模型的准确性.

2)数据误差对估计精度的影响较大.无误差数据组的M_{APE}保持在较低值(1.27%~1.67%).因误差的存在,3组含误差数据的M_{APE}明显高于无误差数据组,且随误差值的增大,M_{APE}及其增幅逐渐增大.这是因为GA偏向于避开高误差点以维持整体精度,但随检测器数量增加,低误差点资源减少,选择高误差点导致精度受损.但是,即便在高误差数据组,M_{APE}仍控制在较低水平(2.71%),这是因为GA具有较强的误差管理能力以及误差的不确定性导致可能出现正负相抵.因此,GA能有效应对误差带来的挑战,在检测器优化布设过程中能发挥关键作用.

在4组检测器误差水平下,不同数量约束下的检测器布设方案如图8所示.其中,纵轴为路段单元编号,横轴为检测器布设数量,实心点表示检测器的安装位置.

图8显示,①检测器布设呈现集中分布特征,主要位于路段单元编号区间为3~8、15~20、75~78、133~137及144~148的路段,这与该区域内存在多个高速公路关键节点(包括4个互通立交)相关.在4组实验中,即便在检测器布设数量受限(仅布设20个)情况下,关键节点区域仍至少配置一组检测器,体现了其对整体监测性能的重要性.②随着误差水平的



(a)无误差数据组　　(b)低误差数据组

(c)中误差数据组　　(d)高误差数据组

图 8　不同数量约束下检测器的布设方案

Fig.8　Sensor deployment schemes under different quantity constraints

增加,检测器布设方案呈现出更大程度的不确定性与结构变化.除关键节点区域外,其余布设点趋于分散,甚至对原有方案进行了显著调整,如起点、终点区域布设策略的改变.该现象说明,在高误差环境下,检测器布设需综合考虑多个复杂因素,包括误差强度、路段交通运行特性以及监测网络的整体感知能力,以实现稳定且精确的服务水平估计.

3.2.2 第二阶段实例研究与结果

图7显示,当布设30个检测器时,无论检测器误差水平如何,第一阶段服务水平指标的估计精度均取得较好效果,故基于30个检测器的布设方案进行以交通事件检测为目标的增设.在仿真软件FOSIM中进行交通事件仿真实验,鉴于本研究针对仿真时段内1 h的交通行为分析,且考虑到交通事件的偶发性和不确定性,选取了交通事件高发的区域——匝道入口下游(路段单元编号为20)作为实验场景.在仿真中表现为临时封闭第二车道40 min,用以模拟发生交通事故/施工作业后的情景,见图9.

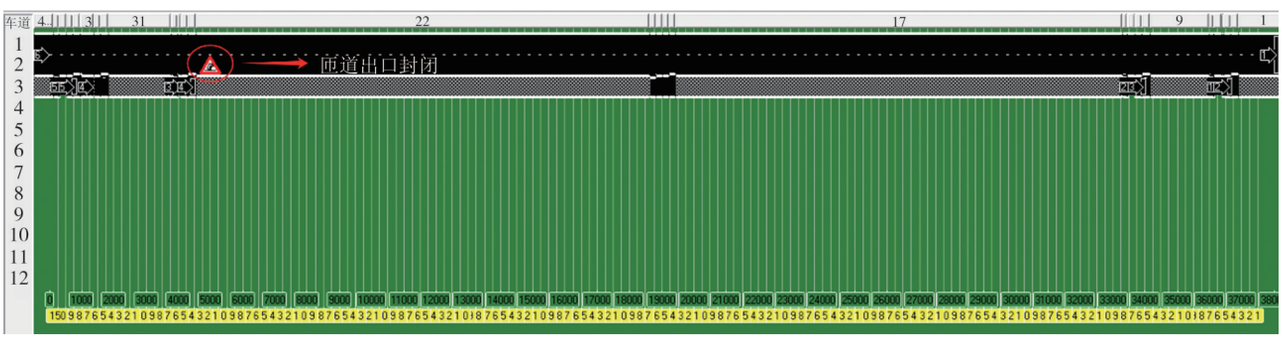


图9 FOSIM交通事件设置

Fig.9 Traffic event settings in FOSIM

在完成交通事件的仿真设置后,需对仿真输出数据进行预处理.本研究将交通状态数据以150 s为时间间隔进行统计,处理后的数据集中,正常交通状态样本占比为70.61%.该统计结果可作为后续交通事件检测率有效性的基本参考依据.为进一步系统评估交通事件检测模型的适应性及检测器增设方案的优化效果,首先采用邻接节点估算法对未布设检测器的路段进行数据补全,以模拟实际高速公路场景中检测数据缺失的情况.随后,以30个初始布设检测器采集的交通数据构建训练集,以补全后的样本作为测试集,用于模型的性能评估.

因仿真结果输出原始数据种类较为有限,为提升模型的表达能力,训练阶段引入多种特征构造,包括速度平方、交通量对数、历史流量滞后项、滑动均值、滑动标准差以及最大-最小比值,以挖掘交通状态的非线性结构与时序特征.模型训练完成后,基于测试集计算堆叠模型的准确率,并作为当前布设方案下的交通事件检测性能指标.

在检测器增设优化过程中,采用GA进行搜索.为提升优化效率并控制计算复杂度,本阶段仍将GA的终止条件设定为固定迭代次数,即在限定的进化代数内完成最优解的搜索.在此过程中,GA持续寻找满足“检测率高于初始布设方案”的个体,并最终输出满足条件的最优解作为该实验条件下的检测器增设结果.各实验组的检测器增设方案、增设前后的D_R以及服务水平估计M_{APE}的对比结果见表4.

表4 检测器增设方案与检测率

Tab.4 Sensor addition plan and detection rate

实验组	增设路段单元编号	增设前D_R/%	增设后D_R/%	增设前M_{APE}/%	增设后M_{APE}/%
无误差数据	12, 61, 89, 92, 134	84.84	91.46	1.47	1.53
低误差数据	40, 105,107, 125, 139	78.20	90.48	1.72	2.13
中误差数据	3, 46, 53, 69, 104	75.53	85.71	1.84	3.89
高误差数据	11, 32, 79, 89, 91	75.00	82.32	1.89	3.11

由表4可知,在布设30个检测器的基础方案下,交通事件检测率随误差水平的增加而显著下降,反映出数据质量对检测性能具有重要影响.在增设检测器后,各误差组的检测率均得到不同程度的提升.其中,低误差数据组的检测率提升幅度更为显著,而高误差数据组在增设后的检测效果上限更高,说明

即使在原始数据质量较高时,适当优化布设方案仍可进一步增强事件检测能力.这一结果验证了增设策略在不同数据误差水平下均具备较强的适应性与提升潜力.

同时,由于4组实验在初始布设方案上存在差异,最终生成的增设方案也呈现出一定的个体化特征.增设后,M_{APE}整体出现了不同程度的上升,尽管误差仍控制在较低范围内(≤3.89%),该现象揭示了布设优化对系统性能可能产生的隐含影响,其成因可归结为以下3个方面:①检测器增设可能引入冗余信息,导致模型对局部噪声的过拟合.尤其是在数据误差较大的实验组中,重复或高度相关的监测点易使模型关注非结构性波动,削弱对整体交通状态的泛化能力,从而增加状态估计误差.②交通状态在事件扰动条件下具有较强的波动性,增设检测器虽提升了局部监测能力,但同时提高了系统对微小状态变化的响应灵敏度.该特性虽有助于事件检测率的提升,使模型更易感知并放大随机误差或短时波动,进而导致M_{APE}上升.③在优化布设过程中采用的GA存在局部最优收敛的风险.受限于复杂约束与大规模搜索空间,部分增设方案可能未能实现全局最优配置,从而在部分区域产生状态估计误差的累积效应.综合来看,尽管检测器增设有效提升了交通事件的检测性能,但对交通状态估计的影响亦需综合考量.

4 结 论

本研究基于FOSIM建立的交通仿真模型,在误差的设置中使用了机会约束,系统研究了各误差条件下的高速公路检测器优化布设策略,得出以下主要结论:

1)在检测误差的影响下,适量增加检测器数量能有效提升服务水平估计的精确度,但超过一定阈值后,因布局复杂性(如关键节点位置)、检测器产生数据的冗余性以及算法修复随机性影响,指标估计精度不升反降.这表明在构建高速公路交通状态监测网络时,需优化检测器数量与位置,以实现最佳的成本效益比和检测效果.

2)交通事件检测率在检测器增设前后均呈现出随误差水平增加而下降的趋势.不同误差水平下检测率的变化幅度存在差异.对于误差较低的数据组,检测器增设后能够显著提升检测性能并达到更高的检测率上限;而在误差水平较高的情形下,虽然最终检测率上限相对受限,但增设带来的改进幅度更为显著.这表明无论面临何种程度的误差,检测器的合理增设均有助于提升系统的事件识别能力,验证了该方法在不确定性环境下的鲁棒性.

3)本研究提出了两阶段法的检测器优化布设方案,并验证了其在提升交通事件检测率及保持服务水平估计精度方面的有效性.对于以高速公路整体运行状态监控为主要需求的场景,可优先采用第一阶段的检测器布设方案,以实现成本效益与监控需求的平衡.而对于需要更精细化交通管理,如对交通事件进行快速响应与精准检测的场景,可采用两阶段检测器布设方案.该方法为提升高速公路交通状态估计精度及事件检测能力提供了优化思路,并为智慧高速的建设提供参考.

由于仿真时段的限制,本研究仅选择了一个事故模拟点进行路段封闭处理,因此事故的影响范围和持续时间较为有限,且单一检测器的采集数据难以全面反映交通事件的复杂性.随着大数据和人工智能技术的发展,未来的检测器布设研究应更加注重多源数据的融合,结合多种固定检测器、移动检测器和智能网联车等设备采集的交通数据,进一步增强交通管理部门在决策中的支持能力,从而提升检测器布设方案所带来的经济与社会效益.

参考文献

[1] OWAIS M, MATOUK A E. A factorization scheme for observability analysis in transportation networks [J]. Expert Systems with Applications, 2021, 174: 114727.

[2] XU X D, LO H K, CHEN A, et al. Robust network sensor location for complete link flow observability under uncertainty [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 88: 1-20.

[3] 徐志航, 么新鹏, 徐志刚, 等. 道路交通检测器及其优化布设方法研究综述[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(10): 68-88.
XU Z H, YAO X P, XU Z G, et al. Review of research on road traffic detectors and its optimized deployment methods [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(10): 68-88. (in Chinese)

[4] 储浩, 杨晓光, 李克平, 等. 基于行程时间估计的快速路检测器布设密度优化方法研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(5): 84-87.
CHU H, YANG X G, LI K P, et al. Optimum method for loop detector layout density for expressway based on travel time

estimation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(5): 84-87.(in Chinese)

[5] 展凤萍. 智慧高速公路交通检测器组合布设方法研究[D]. 南京:东南大学,2017.
ZHAN F P. Methods for combination placement of multi-type traffic sensors on smart roads[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.(in Chinese)

[6] OLIA A, ABDELGAWAD H, ABDULHAI B, et al. Optimizing the number and locations of freeway roadside equipment units for travel time estimation in a connected vehicle environment[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2017, 21(4): 296-309.

[7] CAO Q, LI Z H, MA Y J, et al. Optimal layout of heterogeneous sensors for traffic accidents detection and prevention[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 2512213.

[8] FU C Y, ZHU N, LING S, et al. Heterogeneous sensor location model for path reconstruction[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 91: 77-97.

[9] CONTRERAS S, KACHROO P, AGARWAL S. Observability and sensor placement problem on highway segments: a traffic dynamics-based approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(3): 848-858.

[10] 罗向龙,张生瑞,牛力瑶. 基于检测器优化选择的短时交通流预测[J]. 计算机工程与应用,2017,53(8):199-202.
LUO X L, ZHANG S R, NIU L Y. Short-term traffic flow prediction based on detector optimal selection[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(8): 199-202.(in Chinese)

[11] 董春肖,张立涛,孙洪运,等. 固定交通检测器布设对快速路交通流量预测影响的实证研究[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(2):359-366.
DONG C X, ZHANG L T, SUN H Y, et al. Empirical investigation of the effects of fixed traffic detector deployment on expressway traffic flow forecasting[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(2): 359-366.(in Chinese)

[12] 孙智源,陆化普. 考虑交通大数据的交通检测器优化布置模型[J]. 清华大学学报(自然科学版),2016,56(7):743-750.
SUN Z Y, LU H P. Optimal traffic sensor layout model considering traffic big data[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2016, 56(7): 743-750.(in Chinese)

[13] LIU Y, ZHU N. A multi-objective detector location optimization approach[C]. Proceedings of the 14th COTA International Conference of Transportation Professionals. Reston: ASCE Press, 2014: 1788-1800.

[14] SUN X, BAI Z X, LIN K, et al. Optimization model of traffic sensor layout considering traffic big data[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 2020(19): 1-11.

[15] 栾鑫,程琳,李梦莹. 考虑成本约束和可靠性的检测器优化布设[J]. 东南大学学报(自然科学版),2020,50(3):580-585.
LUAN X, CHENG L, LI M Y. Optimization of sensor location considering cost constraint and reliability[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(3): 580-585.(in Chinese)

[16] ZHU N, MA S F, ZHENG L. Travel time estimation oriented freeway sensor placement problem considering sensor failure[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2017, 21(1): 26-40.

[17] 王仲,钟树伟,徐洪峰. 考虑故障因素的高速公路交通检测器布设[J]. 公路交通科技,2022, 39(11): 158-164.
WANG Z, ZHONG S W, XU H F. Layout of expressway traffic detectors considering failure factors[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(11): 158-164.(in Chinese)

[18] NUGROHO S A, VISHNOI S C, TAHA A F, et al. Where should traffic sensors be placed on highways?[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 13026-13039.

[19] TONG X, LI M, CUI Z C. A hybrid traffic sensor deployment model with communication consideration for highways[J]. Applied Sciences, 2024, 14(2): 536.

[20] LOVISARI E, CANUDAS DE WIT C, KIBANGOU A Y. Density/Flow reconstruction via heterogeneous sources and Optimal Sensor Placement in road networks[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 69: 451-476.

[21] LI R L, MEHR N, HOROWITZ R. Submodularity of optimal sensor placement for traffic networks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2023, 171: 29-43.

[22] 交通信息采集 微波交通流检测器: GB/T 20609—2023[S]. 北京:中国标准出版社, 2023.
Traffic information collection—microwave traffic flow detector: GB/T 20609—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.(in Chinese)

[23] LI J, VAN ZUYLEN H J, WEI G R. Diagnosing and interpolating loop detector data errors with probe vehicle data[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2014, 2423(1): 61-67.